

Е.А. Новиков, Р.О. Ошкин

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ В ФУНКЦИИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ЧАСТИЦ И ИНТЕНСИВНОСТИ КРИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) грунтов отличного вещественного состава при различных режимах их замораживания. Показана возможность использования таких исследований для оценки содержания глинистых частиц в испытуемом геоматериале, величина которого отражает прочность сцепления (связанность) структурных элементов грунта между собой. Установлено, что скорость замораживания образца не влияет на характер ТАЭ, однако связана пропорциональной зависимостью с уровнем последней. Предложен основанный на выявленных закономерностях ТАЭ численный критерий для оценки структурной стабильности грунта при его растеплении. Этот критерий позволяет обрабатывать как единую генеральную совокупность результаты термоакустоэмиссионных испытаний, полученных на различных по массе образцах геоматериала при изменяющейся интенсивности протекающих в них криологических процессов.

Ключевые слова: криотермическое воздействие, грунты, глинистые частицы, эксперимент, акустическая эмиссия, связанность структуры, вещественный состав.

Введение

Устойчивость геотехнических сооружений различного назначения, строящихся и эксплуатирующихся в условиях криолитозоны, или искусственно замораживаемых обводнен-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 16-35-00105 мол_а.

ных участков массива, не может быть обеспечена без надежной информации о исходном состоянии и динамике структуры и свойств толщи грунтов, составляющей фундаментное основание этих сооружений [1]. Для получения указанной информации широко используются различные геофизические методы [2], в частности, активные акустические [3, 4, 5], информативными параметрами которых выступают скорости распространения продольных и поперечных упругих волн высокочастотного сейсмического, звукового и ультразвукового диапазонов частот. Однако для водонасыщенных песчано-глинистых пород результаты, полученные указанными методами могут быть неоднозначны, поскольку значения используемых в них информативных параметров в общем случае являются функцией дисперсности, температуры и засоленности пород. Кроме того, длительный активный акустический мониторинг состояния мерзлых грунтов достаточно трудоемок, а его реализация всегда сопровождается серьезными проблемами обеспечения постоянства характеристик измерительного электроакустического тракта.

В связи со сказанным, представляется актуальной задача использования для изучения качественных и количественных показателей состояния мерзлых грунтов пассивных акустических методов. Одним из таких методов является метод ТАЭ. К настоящему времени известно, что результаты термоакустоэмиссионных исследований позволяют оценивать физико-механические свойства, степень поврежденности и напряженно-деформированное состояние горных пород различных генотипов [6, 7, 8, 9]. Кроме того, установлено, что информативные параметры ТАЭ чувствительны к размеру минерального зерна геоматериалов и другим особенностям их структуры [10, 11]. В тоже время для геокриологических исследований грунтов метод ТАЭ ранее не использовался, хотя важность поиска новых закономерностей, потенциально пригодных для создания на их основе способов для исследования свойств мерзлых грунтов представляется очевидной.

Очевидно, что для создания термоакустоэмиссионного способа исследования криологических процессов непосредственно в массиве мерзлых грунтов вначале необходимо создать и отработать соответствующее методическое обеспечение на образцах. Первым шагом на пути решения этой задачи является ставшее темой настоящей работы изучение влияния вещественного состава грунта на закономерности изменения параметров ТАЭ при его замораживании и оттаивании.

Постановка экспериментов

Объектом исследований являлись навески глины Чкаловского месторождения Ленинградской области, кварцевого песка Лыткаринского карьера со средним размером зерна 0,1–0,25 мм, характеризующегося незначительным процентным содержанием посторонних примесей, а также приготовленные на основе этих грунтов образцы с различным содержанием глины и песка (см. рис. 3). Во все образцы была добавлена вода в количестве 30% от сухой массы. Равномерность распределения влаги в пробе достигалась путем перемешивания последней в течение 10 мин. с помощью лабораторного миксера.

Далее полученная грунтоводная смесь 1 помещалась в цилиндрическую полую металлическую колбу 2 (см. рис. 1), за-

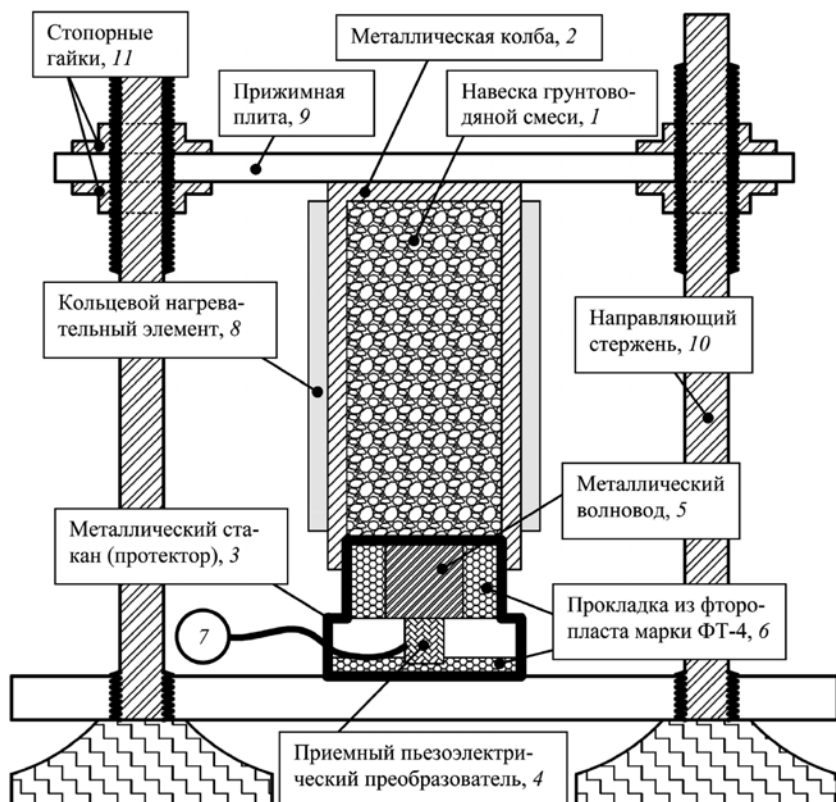


Рис. 1. Схема лабораторной установки для термоакустических испытаний образцов грунтов как в криотемпературной области, так и при их переходе через 0°C

купориваемую металлическим стаканом (протектором) 3, содержащим приемный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) 4. Измерительная информация от испытуемой навески грунта к ПЭП передавалась по металлическому волноводу 5 во фторопластовой опалубке 6, демпфировавшей внешние акустические помехи. Регистрация сигналов с выхода ПЭП производилась с помощью акустико-эмиссионной измерительной системы 7 A-Line 32D. По периметру металлической колбы 2 монтировался кольцевой нагревательный элемент 8, температура которого, задавалась величиной подаваемого на него электрического напряжения, регулируемого с помощью лабораторного автотрансформатора (на рис. 1 условно не показан).

Постоянство контактных условий в ходе эксперимента (в т.ч. нивелирование эффекта морозного пучения) достигалось посредством прижимной плиты 9, положение которой фиксировалось по высоте направляющих стержней 10 с помощью стопорных гаек 11.

Собранная как это показано на рис. 1 конструкция целиком помещалась в морозильную камеру типа SE 10-45 и охлаждалась от комнатной температуры до одной из конечных температур $T_{\text{кон}}$. В различных экспериментах величина $T_{\text{кон}}$ составляла минус 10 °С или минус 20 °С или минус 30 °С или минус 40 °С. На выбранной $T_{\text{кон}}$ каждый образец выдерживался не менее 90 минут и затем локально оттаивался с помощью кольцевого электронагревательного элемента, обеспечивающего нагрев по периметру центральной части образца до температуры ≈ 120 °С. Оттаивание велось вплоть до разрушения ледопородной матрицы, о котором судили по прогреву воздуха в морозильной камере не менее чем до +30 °С. Параллельно велась регистрация параметров акустической эмиссии.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Характерный вид полученных акустограмм показан на рис. 2.

Обнаружено, что во всех случаях вскоре, но не сразу после включения нагревательного элемента возникает область экстремальных значений \dot{N}_z (см. область А на рис. 2). Визуальный контроль извлеченных во время формирования этой области образцов показал, что данный эффект связан с интенсификацией деградации и началом кускования монолитной ледопородной матрицы. Этот процесс сопровождается резким перераспределением термонапряжений, приводящим к возрастанию числа явлений деструкции структуры геоматериала, что и объясняет

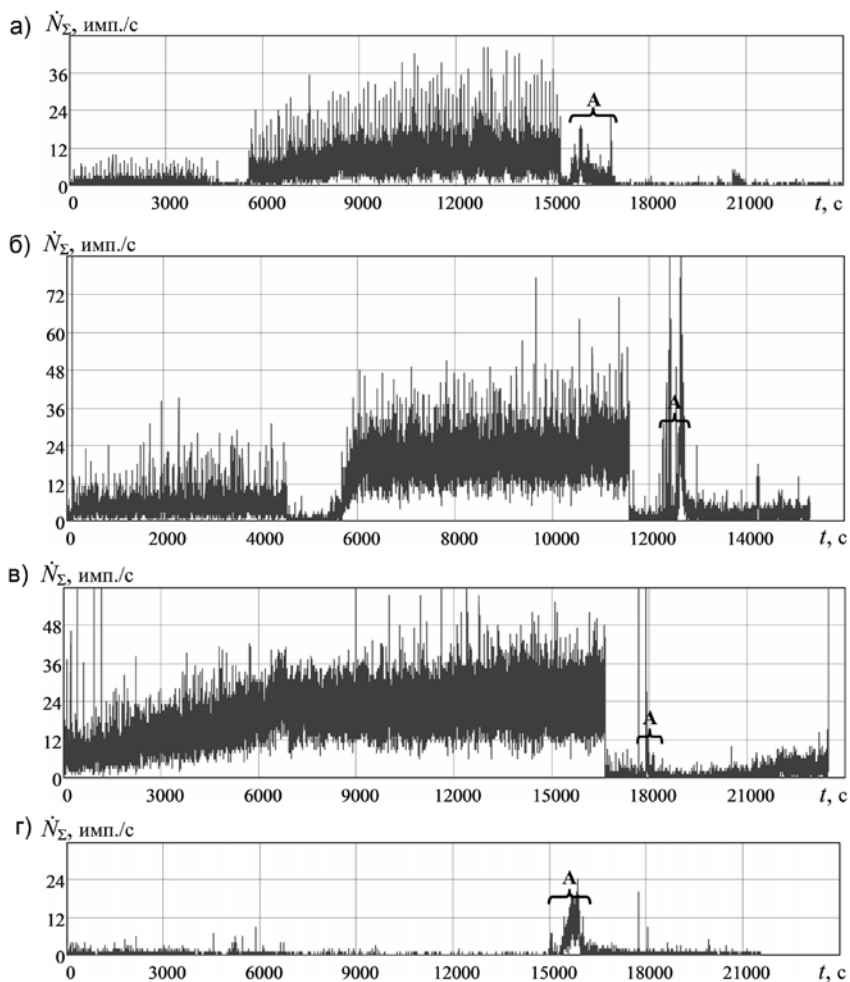


Рис. 2. Характерные экспериментальные зависимости активности \dot{N}_{Σ_z} от времени с начала эксперимента t у образцов: а) глины (100% глины); б) суглинка (30% песка и 70% глины); в) супеси (70% песка и 30% глины); г) песка (100% песка)

резкое возрастание уровня \dot{N}_{Σ_z} ТАЭ. В свою очередь, уровень \dot{N}_{Σ_z} во время заморозки грунта характеризует прочность ледопородной матрицы. Чем выше значения \dot{N}_{Σ_z} в этой области, тем выше уровень термонапряжений в геоматериале и, следовательно, при прочих равных в нем меньше каналов выхода (снятия) внутренних напряжений, которыми обычно выступают различ-

ного рода дефекты. Общеизвестно, что указанные напряжения в связанных геоматериалах, к которым относится замороженный обводненный грунт, растут вплоть до интенсификации в них процессов дефектообразования. После этого геоматериал начинает кусковаться, а напряжения в нем спадают.

Отметим, что выраженный в абсолютных значениях (количество импульсов в единицу времени) уровень активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ нельзя использовать для оценки структуры и состояния геоматериала, так как на этот показатель помимо прочего влияет размер испытываемых образцов. Это влияние может быть достаточно легко учтено при обработке результатов испытаний на образцах, но крайне осложняет использование полученных в лабораторных условиях наработок для исследования ледопородного массива. Это обуславливает необходимость нормирования уровня активности акустической эмиссии в ходе эксперимента к некоторому безразмерному показателю, который должен учитывать только изменения структуры и связанных с ней свойств грунта.

Как это показано выше, уровень \dot{N}_Σ при замораживании навески грунта определяется прочностными свойствами ледопородной матрицы, а при оттаивании – интенсивностью разрушения структурных связей геоматериала. Причем при переходе через 0°C не подверженного значительным механическим нагрузкам грунта в нем преимущественно разрушаются структурные связи криогенной природы, а частицы геоматериала, скрепленные глинистым или схожим связующим сохраняют свое сцепление и источниками ТАЭ не являются. Соответственно у не переуплотненных грунтов как при замораживании, так и при оттаивании в основном реализуются одни и те же источники ТАЭ. Из этого следует, что уровень \dot{N}_Σ при температурах выше 0°C главным образом определяют не физико-механические свойства грунта, а связанность его структурных элементов, оказывающая решающее влияние на затухание сигналов АЭ на их пути от источника к приемному преобразователю.

Экспериментально подтверждено, что такие помеховые факторы как размер образцов, их структурные особенности, аномальные вещественные макровключения и т.д. у каждого образца примерно одинаково влияют на уровень \dot{N}_Σ и при нагреве, и при замораживании. Следовательно, рассчитав отношение уровня акустической эмиссии грунта при его нагреве к аналогичному показателю при замораживании, можно получить безразмерный коэффициент k_s структурной стабильности, каче-

ственно показывающий сохранность сцепления частиц грунта после его размораживания. Таким образом, если для численной оценки уровня ТАЭ использовать такой показатель, как среднюю за определенный период времени активность $M(\dot{N}_{\Sigma_n})$ ТАЭ, то отношение этого показателя, полученного при нагреве грунта $[M(\dot{N}_{\Sigma_n})^H]$ и в области установившихся температур при его заморозке $[M(\dot{N}_{\Sigma_n})^3]$, определяет искомый коэффициент

$$k_s = \frac{M(\dot{N}_{\Sigma_n})^3}{M(\dot{N}_{\Sigma_n})^H}$$

Аномально высокие значения k_s у грунтов с малым содержанием глинистых частиц объясняется малой прочностью ледопородной матрицы, приводящей к низкому уровню \dot{N}_{Σ} на стадии замораживания и формированием значительного большего, чем у глинистых грунтов, числа источников ТАЭ при оттаивании. Последнее следует из того, что после разрушения связующей ледопородной матрицы других структурных связей в песчаных навесках не остается, поэтому каждый структурный элемент (условно «песчинка»), взаимодействуя с соседними структурными элементами, становится источником ТАЭ. С другой стороны у не переуплотненных глинистых пород с примерно одинаковым влагосодержанием после разрушения ледопородной матрицы структурная целостность сохраняется за счет связующего вещества и чем его больше, тем меньше затухание и выше уровень \dot{N}_{Σ} , т.к. количество источников ТАЭ у таких грунтов, как это было оговорено выше, примерно одинаково.

Эксперименты, заключающиеся в замораживании навесок грунта с разной скоростью до различных температур показали сохранение характера ТАЭ и пропорциональное интенсивности протекающих в образце криологических процессов увели-

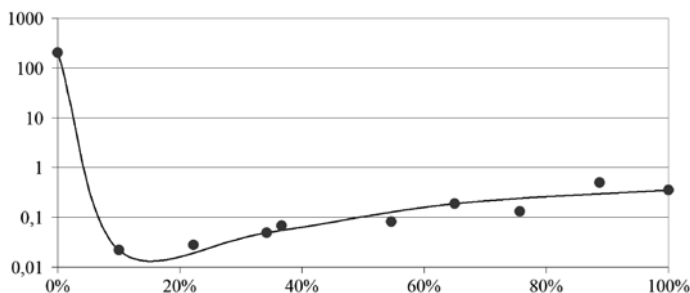


Рис. 3. Зависимость k_s от содержания в образцах глинистых частиц

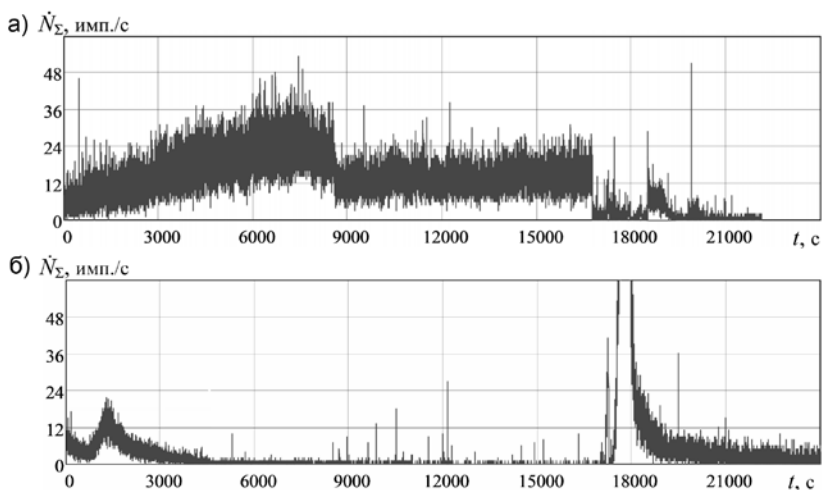


Рис. 4. Характерные экспериментальные зависимости активности \dot{N}_Σ ТАЭ от времени с начала эксперимента t у подвергшихся быстрой заморозке образцов глины (а) и песка (б) при $T_{\text{кон}} = \text{минус } 40^\circ\text{C}$

чение \dot{N}_Σ . Однако это увеличение \dot{N}_Σ справедливо только для неустановившейся температурной области. После достижения образцом любой (исследован диапазон от минус 10°C до минус 40°C) минимально установленной температуры происходит стабилизация \dot{N}_Σ до уровня, который примерно одинаков у всех образцов с аналогичным вещественным составом. Поэтому на величину коэффициента k_s , рассчитывающегося относительно области установившихся температур, и на характер представленной на рис. 3 зависимости интенсивности криологических процессов в геоматериале влияния не оказывает. Сказанное может быть проиллюстрировано рис. 4, где представлены характерные акустограммы образцов глины и песка, замораживающихся в два раза быстрее, чем аналогичные по составу образцы, результаты испытания которых показаны на рис. 2, а и 2, г соответственно.

Например, из рис. 4, а видно, что в области не установившихся температур (до отметки 8600 с) уровень \dot{N}_Σ выше, чем у аналогичной зависимости на рис. 2, а, полученной при $T_{\text{кон}} = \text{минус } 20^\circ\text{C}$. После достижения установленной в эксперименте минимальной температуры ($T_{\text{кон}} = \text{минус } 40^\circ\text{C}$) происходит стабилизация значений \dot{N}_Σ к примерно тому же уровню \dot{N}_Σ ТАЭ, что и в случае области установившихся температур у акустограммы на рис. 2, а.

Выводы

На основе результатов испытаний представительного числа подвергаемых заморозке и быстрому растеплению проб грунтов с различным вещественным составом выявлены закономерности характера термостимулированной акустической эмиссии испытуемого геоматериала в функции от интенсивности воздействующих на него криологических процессов и содержания в нем глинистых частиц, которые определяют связанность его структурных элементов. Разработан основанный на указанных закономерностях численный критерий, позволяющий оценивать стабильность структуры мерзлого грунта при его растеплении. При этом на величину указанного критерия не влияют как вес пробы, так и скорость, а также температура ее замораживания. Это позволяет обрабатывать как единую генеральную совокупность результаты испытаний не нормированных по объему проб грунтов, полученных в существенно различающихся температурных условиях. Исходя из этого, представленные в настоящей работе методические наработки потенциально применимы для адаптации метода термостимулированной акустической эмиссии к решению задачи исследования непосредственно массива мерзлых или замораживаемых грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрусталева Л. Н., Медведев А. В., Пустовойт Г. П. Многолетнее изменение температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли. – 2000. – т. IV. – № 3. – С. 35–41.
2. Зыков Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. – 272 с.
3. Хрусталева Л. Н., Медведев А. В., Пустовойт Г. П. Многолетнее изменение температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли. – 2000. – т. IV. – № 3. – С. 35–41.
4. Воронков О. К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. – 401 с.
5. Тютюник П. М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирования пород. – М.: Недра, 1994. – 251 с.
6. Скворцов А. Г., Царев А. М., Садуртдинов М. Р. Методические особенности изучения сейсмокриологического разреза // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV. – № 4. – С. 110–113.
7. Shkuratnik V. L., Novikov E. A., Oshkin R. O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression // Journal of Mining Science March 2014, Volume 50, Issue 2, pp 249–255.

8. *Shkuratnik V. L., Novikov E. A.* Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks // Journal of Mining Science July 2012, Volume 48, Issue 4, pp. 629–635

9. *Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Ошкин Р. О.* Закономерности акустической эмиссии образцов известняка при их замораживании и оттаивании в функции от величины статического механического нагружения и влагосодержания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 121–127.

10. *Shkuratnik V. L., Novikov E. A.* Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials // Journal of Mining Science. January 2012, Volume 48, Issue 1, pp. 9–14.

11. *Вознесенский А. С., Набатов В. В., Куткин Я. О., Новиков Е. А.* Структурная диагностика горных пород на основе анализа термоакустической эмиссии / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды Всероссийской конференции, посвященной 80-летию академика М. В. Курлени, т. I. – Новосибирск, 2011. – С. 299–304. **VIAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Новиков Е. А.*¹ – доцент, e-mail: e.novikov@misis.ru, ftkp@mail.ru,

*Ошкин Р. О.*¹ – студент,

¹ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 222–224.

UDC (534.6+
53.082.4):
551.34

E. A. Novikov, R. O. Oshkin

PATTERNS IN ACOUSTIC EMISSION OF SOILS ON THEIR FREEZING AND THAWING AS A FUNCTION OF BOTH CLAY CONTENT AND INTENSITY OF CRYOLOGICAL PROCESSES

In this paper describes the results of experimental studies of thermally stimulated acoustic emission (TAE) of soils of different material composition under various freezing conditions. The possibility of using these studies for the assessment of clay content in the geomaterial under test which characterizes cohesive properties of soils has been shown. It has been found that the sample freezing rate does not affect the TAE nature, but has a proportional relationship with its level. Based on the TAE patterns established the numerical criterion of thawed soil structural stability assessment has been suggested. This criterion makes it possible to handle as a single set the results of TAE tests obtained on geomaterial samples of different mass at variable intensity of cryological processes occurring in them.

Key words: cryothermal exposure, soils, clay particles, experiment, acoustic emission, cohesive properties of soil, material composition.

AUTHORS

*Novikov E. A.*¹, Assistant Professor, e-mail: e.novikov@misis.ru, ftkp@mail.ru,

*Oshkin R. O.*¹, Student,

¹ National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Khrustalev L. N., Medvedev A. V., Pustovoyt G. P. *Kriosfera Zemli*. 2000, vol. IV, no 3, pp. 35–41.
2. Zikov Yu. D. *Geofizicheskie metody issledovaniya kriolitozony* (Geophysical research methods for permafrost zone), Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2007, 272 p.
3. Khrustalev L. N., Medvedev A. V., Pustovoyt G. P. *Kriosfera Zemli*. 2000, vol. V, no 3, pp. 35–41.
4. Voronkov O. K. *Inzhenernaya seysmika v kriolitozone (Izuchenie stroeniya i svoystv merzlykh i talykh gornyykh porod i massivov)* (Инженерная сейсмика в криолитозоне (Engineering seismology in permafrost zone (Analysis of structure and properties of frozen and thawed rock masses))), Saint-Petersburg, Izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2009, 401 p.
5. Tyutyunik P. M. *Geoakusticheskiy kontrol' protsessov zamorazhivaniya i tamponirovaniya porod* (Geoacoustic control of freezing and plugging of rocks), Moscow, Nedra, 1994, 251 p.
6. Skvortsov A. G., Tsarev A. M., Sadurtdinov M. R. *Kriosfera Zemli*. 2011, vol. XV, no 4, pp. 110–113.
7. Shkuratnik V. L., Novikov E. A., Oshkin R. O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*, March 2014, Volume 50, Issue 2, pp 249–255.
8. Shkuratnik V. L., Novikov E. A. Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks. *Journal of Mining Science*, July 2012, Volume 48, Issue 4, pp. 629–635
9. Shkuratnik V. L., Novikov E. A., Oshkin R. O. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 121–127.
10. Shkuratnik V. L., Novikov E. A. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials. *Journal of Mining Science*. January 2012, Volume 48, Issue 1, pp. 9–14.
11. Voznesenskiy A. S., Nabatov V. V., Kutkin Ya. O., Novikov E. A. *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli. Trudy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu akademika M. V. Kurleni*, t. 1 (Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior: Proceedings of the All-Russian Conference Devoted to the 80th Anniversary of Academician M.V. Kurlenya, vol. 1), Novosibirsk, 2011, pp. 299–304.



МЫСЛИ О РОЛИ КНИГИ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Любовь к русскому языку не является привилегией только специалистов-языковедов. Скорее, это обязанность всей российской интеллигенции. На Земле было много народов, которые исчезли по единственной причине: они не сумели сохранить свой язык и поэтому растворились среди других народов.

Плохое владение родным языком сегодня становится очевидным и служит всем нам предупреждением о том, что необходимо последовательно и постепенно прививать любовь к языковой культуре, бережно относиться к его чистоте, не засорять вульгаризмами, больше читать и писать.